

ظرفیت حرارتی ویژه چوب اصلاح حرارتی شده در شرایط دمایی و رطوبتی متفاوت

چکیده

مقدار ظرفیت حرارتی ویژه چوب برای فرایندهایی که در آنها نیاز به انتقال حرارت در چوب است و نیز در طراحی سازه‌های چوبی که متحمل تغییرات دمایی زیاد طی روز می‌شوند، مهم است. در این تحقیق، ظرفیت حرارتی ویژه چوب بلوط اصلاح حرارتی شده در مقایسه با چوب معمولی آن با استفاده از تکنیک گرماسنجی روبشی تفاضلی در دامنه دمایی ۲۰- الی ۲۰ درجه سانتی‌گراد و تحت شرایط خشک و تر اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که تفاوت معنی‌داری بین ظرفیت حرارتی ویژه دو نوع چوب در شرایط خشک وجود ندارد و مقدار میانگین آن در دماهای ۲۰ و ۲۰- درجه سانتی‌گراد به ترتیب برابر با ۱/۴۷ و ۰/۸۴ ژول بر گرم کلوین بود. در مقابل، در دمای ۲۰- درجه سانتی‌گراد، ظرفیت حرارتی ویژه چوب اصلاح شده تحت شرایط تر بیشتر از چوب معمولی بود و شار حرارتی بیشتری برای ذوب یخ موجود در آن مصرف شد. برخلاف رابطه خطی بین ظرفیت حرارتی ویژه خشک و دما در دامنه دمایی ۰ تا ۲۰ درجه سانتی‌گراد، در هر دو نوع چوب در دمای کمتر از صفر درجه سانتی‌گراد این رابطه به صورت غیرخطی بود.

واژگان کلیدی: ظرفیت حرارتی ویژه، چوب اصلاح حرارتی شده، گرماسنجی روبشی تفاضلی.

اصغر طارمیان^{۱*}

^۱ دانشیار گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

مسئول مکاتبات:

tarmian@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۷/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۰۴

مقدمه

یکی از ویژگی‌های ترمودینامیکی مهم مواد، ظرفیت حرارتی است. ظرفیت حرارتی (C) عبارت است از مقدار حرارتی که باید ماده دریافت کرده و یا از دست بدهد (Q) تا دمای آن به اندازه یک درجه تغییر کند (dT) و با معادله یک بیان می‌شود:

$$C = \frac{Q}{dT} \quad (1)$$

یکای (واحد) ظرفیت حرارتی نسبت یکای انرژی به یکای دما است و در دستگاه بین‌المللی یکاها (SI)^۲ ژول بر کلوین است. در مقیاس نانو، ظرفیت حرارتی یک ماده به ظرفیت آن برای ذخیره کردن انرژی ارتعاشی برای مثال به صورت ارتعاشات ملکولی^۳ در پیوندهای کووالانسی بستگی دارد. بر این اساس، ظرفیت حرارتی یک ماده از سه مولفه تشکیل شده است که یکی ناشی از ارتعاش ملکولی ماده (C_{vib})، دیگری ناشی از انبساط حرارتی آن (C_{ext}) و سومی نیز متاثر از جنبش صورت‌بندی^۴ اجزای

² International system of units

³ Molecular vibrations

⁴ Conformational motion

¹ Heat capacity

پلیمری آن (c_{conf}) مانند چرخش گروه‌های شیمیایی است [۱]:

$$c_p = c_{vib} + c_{ext} + c_{conf} \quad (2)$$

ظرفیت حرارتی را می‌توان به مقدار ماده (جرم یا حجم) تقسیم کرد تا این کمیت فیزیکی مستقل از اندازه یا جرم ماده باشد. برای این منظور اندازه‌گیری "ظرفیت حرارتی ویژه" یا "گرمای ویژه" مواد متداول است. ظرفیت حرارتی ویژه عبارت است از ظرفیت حرارتی یک ماده به ازای واحد جرم آن (m) و در SI یکای آن ژول بر گرم کلوین است و با معادله زیر بیان می‌شود:

$$c = \frac{Q}{mdT} \quad (3)$$

مقدار ظرفیت حرارتی ویژه چوب برای فرایندهایی که در آنها نیاز به انتقال حرارت در چوب است (مانند فرایندهای سوختن و تولید انرژی، بخاردهی و چوب خشک‌کنی)، محاسبه دقیق سایر خواص ترمودینامیکی مانند آنتالپی و نیز اندازه‌گیری مقدار گرمای مبادله شده طی جذب و دفع رطوبت توسط چوب مهم است [۱]. همچنین، ظرفیت حرارتی در طراحی سازه‌های چوبی در مکان‌هایی که متحمل تغییرات دمایی زیاد طی روز هستند، مهم است. استفاده از مواد با ظرفیت حرارتی بالا مانند چوب در ساخت ساختمان‌ها، موجب می‌شود که انرژی حرارتی دریافتی طی روز بیشتر ذخیره شده و به تدریج در ساختمان رها شده و در نتیجه موجب صرفه‌جویی در انرژی می‌شود. همچنین، اطلاع از ظرفیت حرارتی ویژه فراورده‌های فشرده چوبی مانند تخته‌خرده-چوب برای پیش بینی سرعت انتقال حرارت طی مرحله خنک‌کردن تخته‌های پرس شده و یا به هنگام دسته‌بندی گرم آنها برای دستیابی به خواص مورد نیاز پانل‌ها مهم است [۲]. تاکنون وابستگی ظرفیت حرارتی چوب به دما و رطوبت با مدل‌های ریاضی رگرسیونی مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است [۳، ۴، ۵]. محققین متعددی نیز ظرفیت حرارتی ویژه چوب و پوست گونه‌های مختلف را اندازه‌گیری کردند [۶، ۷، ۸، ۹]. ظرفیت حرارتی ویژه چوب به عنوان یک ماده متخلخل‌نم‌پذیر مجموع ظرفیت

حرارتی ویژه هوا، رطوبت (شامل آب آغشته‌گی و آب آزاد) و ماده جامد خشک دیوار سلولی است. آب نسبت به ترکیبات دیوار سلولی چوب ظرفیت حرارتی ویژه بالاتری دارد، بنابراین چوب مرطوب نسبت به چوب خشک ظرفیت حرارتی ویژه بالاتری دارد. نتایج تحقیقات گذشته حاکی از آن است که در دامنه دمایی ۰ الی ۱۱۲ درجه سانتی‌گراد، ظرفیت حرارتی ویژه چوب مستقل از گونه و دانسیته است [۱۰]. در مقابل، یک رابطه خطی بین ظرفیت حرارتی ویژه و دمای چوب در دامنه دمایی ۰ الی ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد وجود دارد که برای نخستین بار Dunlap (۱۹۱۲) از طریق اندازه‌گیری ظرفیت حرارتی ویژه ۲۰ گونه چوبی با جرم ویژه بین ۰/۲۳ الی ۱/۱۰ گرم بر سانتیمتر مکعب رابطه رگرسیونی زیر را در این دامنه دمایی پیشنهاد کرد [۳]:

$$c_p = 0.266 + 0.001167T \quad (4)$$

در معادله فوق ظرفیت حرارتی ویژه چوب خشک شده در آن (c_p) بر حسب کالری بر گرم درجه سانتی‌گراد و دما (T) بر حسب درجه سانتی‌گراد است. Aggrey-Smith و همکاران (۲۰۱۶) ظرفیت حرارتی ویژه ۱۳ گونه پهن برگ گرمسیری را در دامنه ۱/۰۱ الی ۱/۹۷ ژول بر گرم کلوین گزارش کردند و بیان کردند که بین هدایت حرارتی چوب و ظرفیت حرارتی ویژه آن ارتباطی وجود ندارد [۱۱]. Czajkowski و همکاران (۲۰۱۶) ظرفیت حرارتی تخته فیبر سبک و انواع تخته‌خرده‌چوب را علی‌رغم تفاوت در دانسیته در دامنه ۱۴۲۰-۱۴۵۰ ژول بر کیلوگرم کلوین گزارش کردند و بیان کردند که دانسیته این نوع فراورده‌ها بر ظرفیت حرارتی آنها بی‌تاثیر است [۲]. Li و همکاران (۲۰۱۳) مقدار ظرفیت حرارتی ویژه تخته فیبر نیمه سنگین^۳ (MDF) را در دمای ۱۰ درجه سانتی‌گراد برابر با ۱۱۰۰ ژول بر کیلوگرم کلوین گزارش کردند و مقدار آن را به صورت تابعی از دما در دامنه دمایی ۱۰ الی ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد مدل‌سازی کردند [۱۲]. Thybring (۲۰۱۴) ظرفیت حرارتی ویژه ترکیبات دیوارسلولی چوب را با ارتعاش ملکولی بیان کرد و دریافت که اگرچه در ظرفیت حرارتی ناشی از ارتعاشات ملکولی

^۱ Specific heat capacity

^۲ Specific heat

^۳ Medium density fiberboard

نمونه‌های چوبی در داخل بالن، خلایی به مقدار حدود صفر میلی‌بار برای مدت ۳۰ دقیقه اعمال شد. سپس، با تزریق آب مقطر به داخل بالن با استفاده از یک سرنگ خلاء قطع شد. پس از این مرحله، نمونه‌ها تحت فشار اتمسفری برای مدت ۲ ساعت در آب غوطه ور باقی ماندند تا عملیات اشباع تکمیل شود.

اندازه‌گیری ظرفیت حرارتی ویژه

مبانی نظری

اندازه‌گیری مستقیم ظرفیت حرارتی یا ظرفیت حرارتی ویژه امکان‌پذیر نیست. در ابتدا باید حرارت یا دما اندازه‌گیری شده و سپس ظرفیت حرارتی محاسبه شود. بنابراین، اندازه‌گیری آن مستلزم انتقال حرارت به ماده و تغییر دمای آن است. برای این منظور، انتقال حرارت با استفاده از کالیمترها^۱ اغلب به صورت مخلوط کردن دو ماده مختلف با دماهای متفاوت بدون اتلاف حرارت و یا به روش حرارت‌دهی الکتریکی انجام می‌شود. در دهه‌های اخیر با توسعه روش‌های کالیمتری، خواص ترمودینامیکی مواد به آسانی و با دقت بالا با استفاده از روش گرماسنجی روبشی تفاضلی (DSC)^۲ اندازه‌گیری می‌شود. اندازه‌گیری ظرفیت حرارتی ویژه یک ماده با استفاده از DSC مستلزم استفاده از یک نمونه مرجع با وزن و ظرفیت حرارتی مشخص است. نمونه مرجع می‌تواند یک نمونه دیسکی شکل یا قوت کبود مصنوعی^۳ به اندازه ۱۰ تا ۱۰۰ میلی‌گرم باشد. با استفاده از منحنی‌های جریان حرارت در نمونه مرجع و ماده مورد نظر (شکل ۱) و معادله زیر ظرفیت حرارتی ویژه ماده Cp (s) محاسبه می‌شود [۱۳]:

$$Cp(s) = Cp(st) \cdot \frac{Ds \cdot Wst}{Dst \cdot Ws} \quad (5)$$

در معادله فوق Cp (s) ظرفیت حرارتی ویژه نمونه (ژول بر گرم کلونین)، Cp(st) ظرفیت حرارتی ویژه یا قوت کبود (ژول بر گرم کلونین)، Ds تغییر مکان در محور

زایلان، گلوکومانان، سلولز و لیگنین در دامنه دمایی ۵-۳۷۰ کلونین تفاوتی وجود دارد ولی در ظرفیت حرارتی کل آنها در این دامنه دمایی تفاوتی مشاهده نکرد [۱]. با توجه به مصرف روز افزون چوب اصلاح حرارتی شده به عنوان یک فراورده دوست‌دار محیط زیست در انواع مبلمان‌های شهری و پارکی، تاکنون نتایج تحقیقی در ارتباط با اندازه‌گیری مقدار ظرفیت حرارتی ویژه آن گزارش نشده است. بنابراین، در تحقیق حاضر مقدار ظرفیت حرارتی ویژه این نوع چوب اصلاح شده و تغییرات آن در دماهای مختلف تحت شرایط خشک و تر در مقایسه با چوب معمولی بررسی شد. با توجه به تغییرات ایجاد شده در خواص فیزیکی و ساختار شیمیایی چوب در اثر اصلاح حرارتی، تحقیق حاضر بر این فرضیه استوار است که چوب اصلاح حرارتی شده در مقایسه با چوب معمولی در برابر تغییرات دمایی محیط بسته به مقدار رطوبت آن، عکس‌العمل متفاوتی نشان می‌دهد و ظرفیت حرارتی ویژه آن متفاوت است.

مواد و روش‌ها

نمونه برداری و عملیات اصلاح حرارتی

از تخته‌های بلوط (*Quercus castanifolia*) خشک شده در کوره با رطوبت کمتر از ۱۵ درصد و با ضخامت اسمی ۲۰ میلی‌متر استفاده شد. عملیات اصلاح حرارتی در محیط بخار آب و داخل یک کوره ترمووود در دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد برای مدت ۳ ساعت با استفاده از فرایند تولید ترمووود نوع S انجام شد.

اشباع نمونه‌ها با آب مقطر

در ابتدا، دو سری نمونه‌های چوبی بریده شده به ابعاد ۱×۱۰×۵ (T×L×R) میلی‌متر در یک آون خلاء در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد تا رطوبت صفر درصد خشک شدند. سپس، یک دسته از نمونه‌های خشک شده، با آب مقطر داخل یک بالن شیشه‌ای دو دهانه مجهز به سیستم خلاء اشباع شدند و دسته دیگر بدون اعمال عملیات اشباع و در شرایط خشک شده برای اندازه‌گیری ظرفیت حرارتی ویژه مورد استفاده قرار گرفتند. برای عملیات اشباع از فرایند خلاء/فشار استفاده شد. برای این منظور، پس از قرار دادن

¹ Calorimeters

² Differential scanning calorimetry

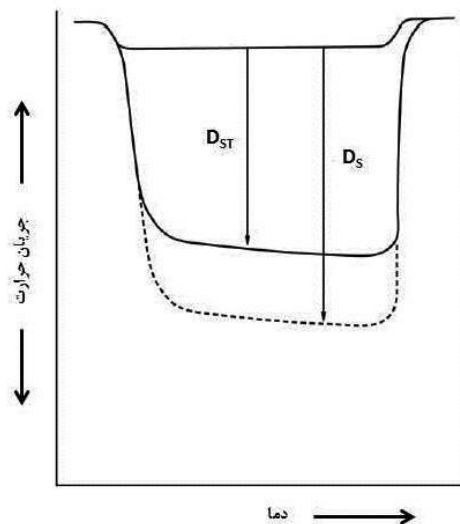
³ Synthetic sapphire

(α -Al₂O₃) یا قوت کبود متعلق به کانی‌های گران قیمت کوراندوم (اکسید آلومینیوم)

بوده و سخت‌ترین ماده پس از الماس است

DSC مربوط به نگهدارنده نمونه و نمونه یا قوت کبود در دمای معین (mW)، Ws جرم نمونه (میلی گرم) و Wst جرم یا قوت کبود استاندارد (میلی گرم) است.

عمودی بین منحنی‌های حرارتی DSC مربوط به نگهدارنده نمونه و نمونه مورد نظر در دمای معین (mW)، Dst تغییر مکان در محور عمودی بین منحنی‌های حرارتی



شکل ۱- منحنی‌های حرارتی نمونه مرجع و نمونه با ظرفیت حرارتی ویژه نامشخص در روش DSC [۱۳]

میلی لیتر در دقیقه تا دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد افزایش یافت. دقت اندازه‌گیری دما برابر با ± 0.5 درجه سانتی‌گراد بود. در نهایت، ظرفیت حرارتی ویژه نمونه‌ها بر حسب ژول بر گرم کلوین اندازه‌گیری و گزارش شد.

تجزیه و تحلیل آماری

آزمایشات در قالب طرح کاملاً تصادفی و با پنج تکرار برای هر تیمار انجام شد. از آزمون چند دامنه دانکن در سطح اعتماد ۹۵ درصد برای گروه‌بندی میانگین داده‌ها استفاده شد.

نتایج و بحث

ظرفیت حرارتی ویژه نمونه‌های خشک

نتایج نشان داد که تحت شرایط خشک، تفاوت معنی‌داری بین ظرفیت حرارتی ویژه چوب اصلاح حرارتی شده و چوب معمولی در دامنه دمایی ۲۰- الی ۲۰ درجه سانتی‌گراد وجود ندارد (شکل ۲). ظرفیت حرارتی ویژه نمونه‌ها در دماهای ۲۰- و ۲۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب در دامنه‌های ۱/۶-۰/۸۲ و ۳/۲۹-۲/۷۹ ژول بر گرم کلوین متغیر بود. در هر دو نوع چوب، در دامنه دمایی ۰ الی ۲۰

روش آزمایشگاهی

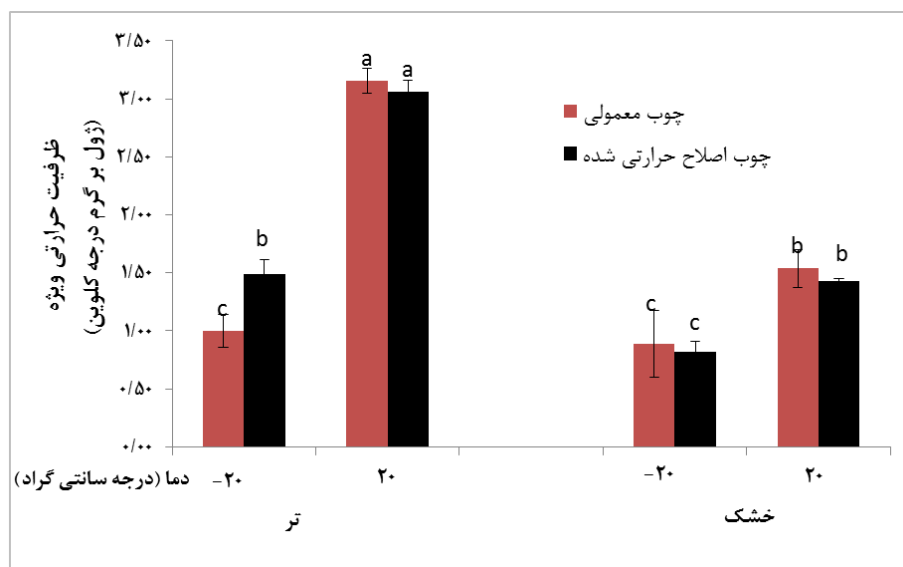
ظرفیت حرارتی ویژه نمونه‌های خشک و تر با استفاده از تکنیک گرماسنجی روبشی تفاضلی (DSC) مطابق با استاندارد ASTM E 1269 در دامنه دمایی ۲۰- الی ۲۰ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شد. مطابق با این استاندارد به هنگام اندازه‌گیری ظرفیت حرارتی نباید کاهش جرم یا تغییرات شیمیایی در ماده رخ دهد. از دستگاه DSC مدل Q2000 با قابلیت کار در دامنه دمایی ۱۸۰- الی ۷۲۵ درجه سانتی‌گراد و با امکان بارگذاری ۵۰ نمونه به طور همزمان و سیستم خنک‌کننده خودکار بدون استفاده از نیتروژن مایع استفاده شد (شکل ۱). در ابتدا، نمونه‌های دیسکی شکل به ضخامت یکی میلی‌متر و با قطر متناسب با قطر پن‌های آلومینیومی بریده شد و در داخل پن‌ها قرار گرفتند. شکل هندسی نمونه‌ها طوری انتخاب شد که بیشترین تماس را با پن‌های آلومینیومی داشته باشند. جرم نمونه‌ها نیز با دقت ۰/۰۱ میلی‌گرم اندازه‌گیری شد. دمای شروع برنامه DSC برابر با ۲۰- درجه سانتی‌گراد و مدت زمان متعادل سازی^۱ برابر با ۵ دقیقه بود. سپس دمای نمونه‌ها با حرارت‌دهی یکنواخت و با سرعت ثابت ۲ درجه بر دقیقه و دبی جریان گاز نیتروژن برابر با ۵۰

^۱ Equilibrium time

مقابل، در دامنه دمایی ۰ الی ۲۰- درجه سانتی‌گراد در هر دو نوع چوب، رابطه غیرخطی بین ظرفیت حرارتی ویژه و دما مشاهده شد (شکل ۳).

برای هر دو نوع چوب، در دمای کمتر از صفر درجه سانتی‌گراد این رابطه به صورت دو منحنی خطی با شیب متفاوت بود، به نحوی که آغاز شکل‌گیری منحنی دوم در دمای متوسط ۱۶- درجه سانتی‌گراد بود. اعتقاد بر این است که در دمایی که تغییر فاز آب آغشتگی به پایان می‌رسد، شیب منحنی نیز تغییر می‌کند [۱۰]، اگرچه نمونه‌های مورد مطالعه در این تحقیق کاملاً خشک و عاری از آب آغشتگی بودند.

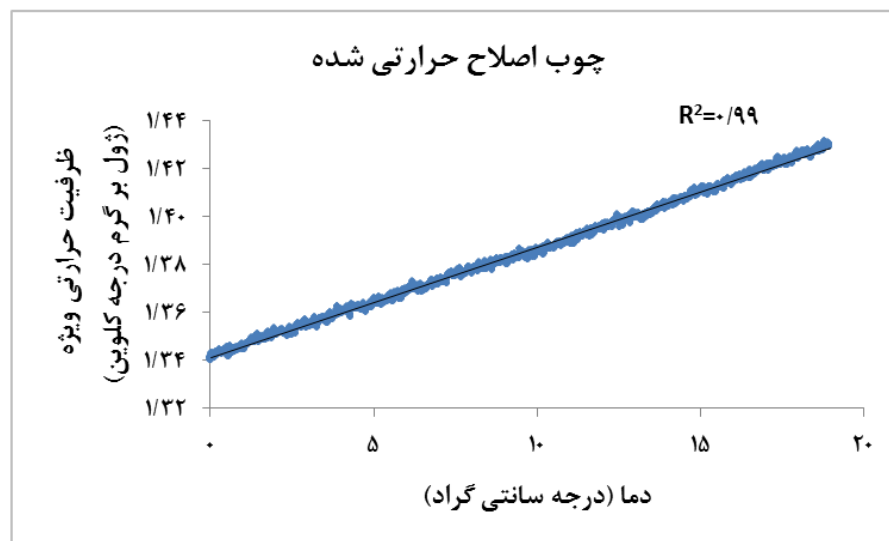
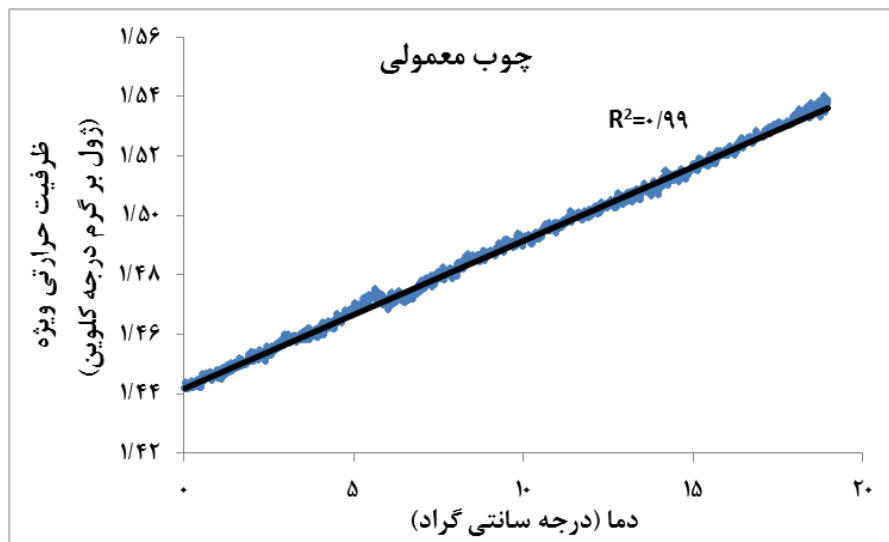
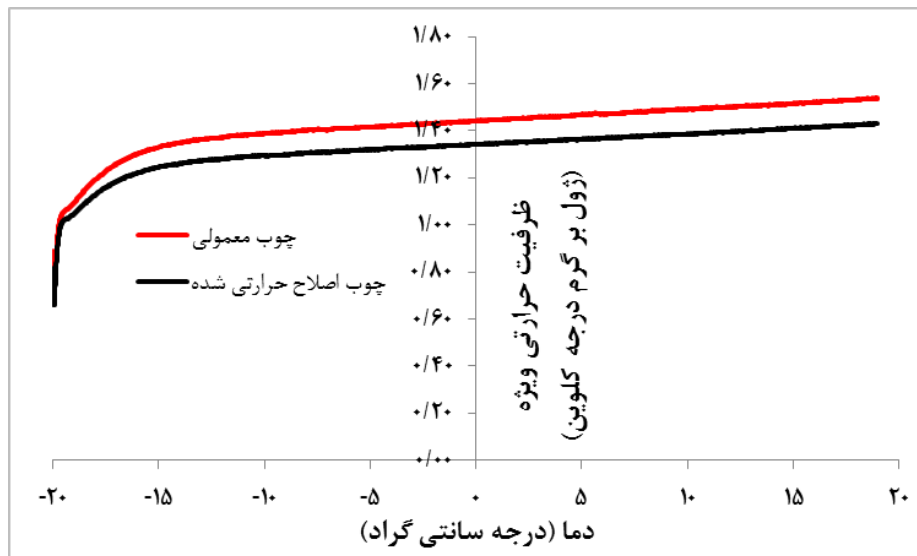
درجه سانتی‌گراد یک رابطه خطی بین ظرفیت حرارتی ویژه چوب و دما وجود داشت و با افزایش دما بر مقدار ظرفیت حرارتی آنها افزوده شد ($R^2=0/99$ ، شکل‌های ۳ و ۴). سایر محققین نیز چنین همبستگی مثبت خطی را بین ظرفیت حرارتی ویژه چوب خشک و دما در دامنه دمایی ۰-۱۰۰ درجه سانتی‌گراد گزارش کردند [۱، ۳، ۴، ۵]. ظرفیت حرارتی ماده متأثر از انرژی ذرات تشکیل دهنده آن (انرژی درونی) است. انرژی درونی مواد در اثر انتقال حرارت به واسطه دریافت یا از دست دادن انرژی تغییر می‌کند. افزایش دما سبب انرژی ارتعاشی و چرخشی^۲ بیشتر ملکول‌های ماده شده و در نتیجه انرژی درونی و به موجب آن ظرفیت حرارتی ماده افزایش می‌یابد [۱۱]. در



شکل ۲- ظرفیت حرارتی ویژه چوب معمولی و اصلاح حرارتی شده در شرایط خشک و تر و در دماهای ۲۰ و ۲۰- درجه سانتی‌گراد

^۱ Internal energy

^۲ Rotation and vibration



شکل ۴- همبستگی خطی بین ظرفیت حرارتی ویژه و دما در چوب معمولی و اصلاح حرارتی شده در شرایط خشک شده

ظرفیت حرارتی ویژه نمونه‌های تر

بر اساس منحنی‌های DSC و پیک ذوب مشاهده شده (شکل ۵) می‌توان گفت که در چوب اصلاح حرارتی شده فرایند ذوب و تغییر فاز آب مایع (آزاد) یخ زده در دمای مشابه با چوب معمولی رخ می‌دهد ولی مقدار انرژی حرارتی مصرفی برای ذوب آب یخ زده (گرمای نهان ذوب) در چوب اصلاح شده بیشتر از چوب معمولی است. در اثر حرارت‌دهی نمونه‌های یخ زده، دمای هر دو نوع چوب با شیب تندی افزایش یافت تا به دمای نقطه ذوب برسد. پس از فرایند ذوب، دمای هر دو نوع چوب مجدداً ولی با شیب ملایم‌تری افزایش یافت. برخلاف نمونه‌های خشک شده، در شرایط تر (اشباع از آب) و در دمای ۲۰- درجه سانتی‌گراد، ظرفیت حرارتی ویژه چوب اصلاح حرارتی شده به طور معنی‌داری بیشتر از چوب معمولی بود (شکل ۲). به عبارت دیگر در شرایط تر و در دماهای کمتر از صفر درجه سانتی‌گراد برای افزایش دمای چوب اصلاح شده به انرژی حرارتی بیشتری نیاز است. همچنین، نتایج نشان داد که برخلاف همبستگی خطی بین ظرفیت حرارتی ویژه نمونه‌های خشک و دما، در دامنه دمایی صفر تا ۲۰ درجه سانتی‌گراد رابطه بین دما و ظرفیت حرارتی ویژه برای نمونه‌های تر یک رابطه غیرخطی بود، ضمن اینکه یک افزایش ناگهانی در مقدار ظرفیت حرارتی در دمایی نزدیک به دمای صفر درجه سانتی‌گراد رخ داد (شکل‌های ۶ و ۷). این افزایش در ظرفیت حرارتی می‌تواند ناشی از تغییر فاز آب آزاد باشد. مشابه نتایج به دست آمده تحت شرایط خشک، در دمای کمتر از صفر درجه سانتی‌گراد، رابطه بین ظرفیت حرارتی ویژه و دما برای نمونه‌های تر نیز به صورت دو منحنی خطی با شیب‌های متفاوت بود، با این تفاوت که منحنی دوم دیرتر و در دمای حدود ۲- الی ۳- درجه سانتی‌گراد شکل گرفت و از شیب بیشتری نسبت به منحنی اول برخوردار بود. افزایش ناگهانی در مقدار ظرفیت حرارتی ویژه در این دما می‌تواند ناشی از شار حرارتی مصرفی برای تغییر فاز آب آزاد یخ زده باشد. اعتقاد بر این است که فرایند ذوب یخ موجود در چوب در دمای بین ۲- الی ۱- درجه سانتی‌گراد رخ می‌دهد [۱۴]. بر اساس یافته‌های تحقیق حاضر، میانگین

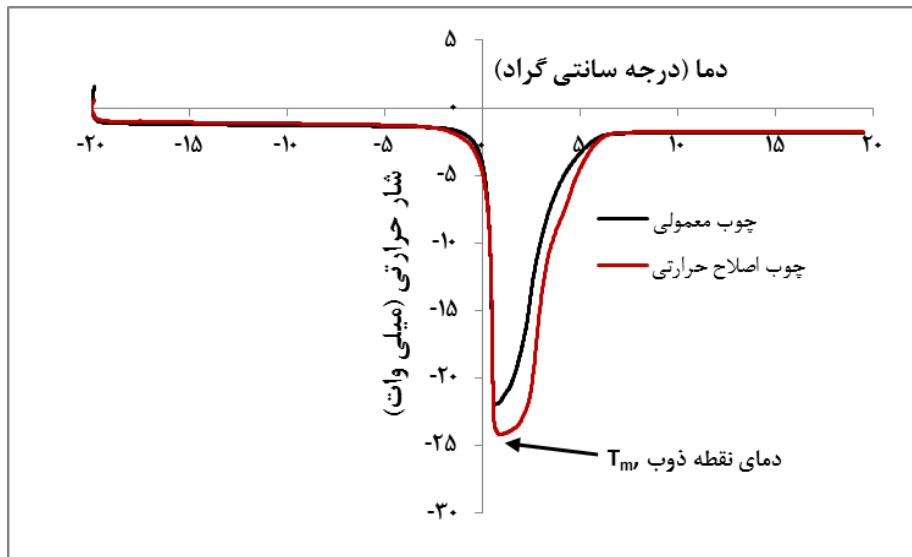
دمای نقطه ذوب آب یخ زده در هر دو نوع چوب برابر با ۰/۶۵ درجه سانتی‌گراد بود.

نتایج همچنین نشان داد که در اثر اشباع چوب معمولی با آب بر مقدار ظرفیت حرارتی آن در دامنه دمایی ۲۰ الی ۲۰- درجه سانتی‌گراد افزوده می‌شود. ظرفیت حرارتی ویژه آب در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد برابر با ۴/۱۸۴ ژول بر گرم کلونین است که مقدار آن به مراتب بیشتر از ظرفیت حرارتی ویژه ماده چوبی خشک است. متوسط ظرفیت حرارتی سلولز، لیگنین و زایلان در همین دما برابر با ۱/۲ ژول بر گرم کلونین گزارش شده است [۱]. بنابراین، انتظار می‌رود که به واسطه اشباع چوب با آب بر مقدار ظرفیت حرارتی آن افزوده شود. در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد مقدار ظرفیت حرارتی ویژه چوب معمولی خشک و تر به ترتیب برابر با ۱/۵۳ و ۳/۱۵ ژول بر گرم کلونین به دست آمد. افزایش ظرفیت حرارتی چوب تر در مقایسه با چوب خشک در شرایط یخ زده نیز متأثر از بیشتر بودن ظرفیت حرارتی یخ ($C_{ice}=2/108 \text{ J.g}^{-1}\text{K}$) در مقایسه با پلیمرهای تشکیل دهنده دیوار سلولی است. در مورد چوب اصلاح حرارتی شده اگرچه در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد نمونه‌های تر از ظرفیت حرارتی ویژه بیشتری در مقایسه با نمونه‌های خشک برخوردار بودند ولی در دمای ۲۰- درجه سانتی‌گراد، اثر مقدار رطوبت بر ظرفیت حرارتی چوب اصلاح شده معنی‌دار نبود. در هر دو نوع چوب، اثر رطوبت بر مقدار ظرفیت حرارتی در دماهای بالاتر بیشتر بود. بر اساس تحقیقات گذشته، رابطه خطی زیر بین ظرفیت حرارتی چوب خشک و چوب مرطوب متناسب با مقدار رطوبت چوب پیشنهاد شده است [۴]:

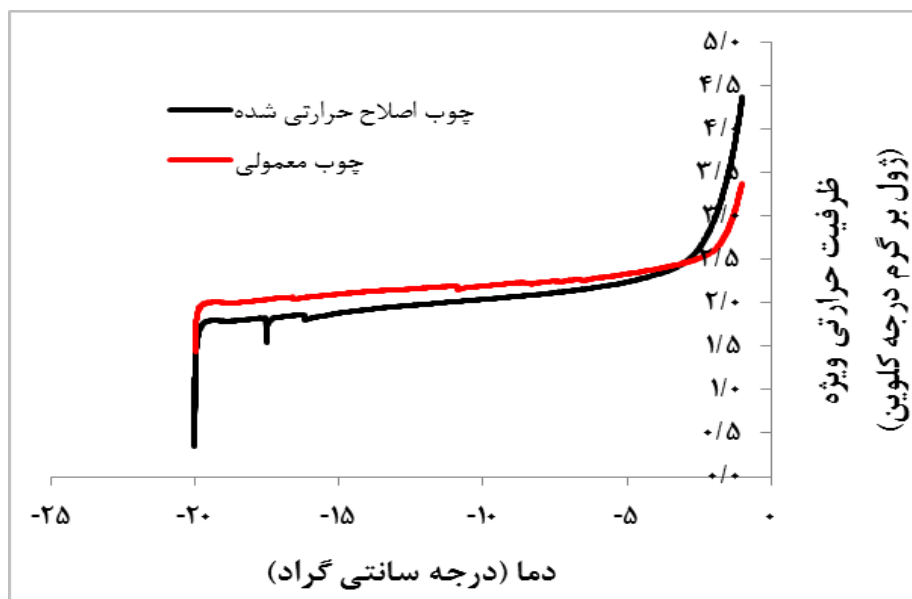
$$c_{w} = (4.19u + c_d)/(1 + u) \quad (6)$$

در معادله فوق c_d ظرفیت حرارتی ویژه چوب خشک (کیلوژول بر کیلوگرم کلونین)، c_w ظرفیت حرارتی ویژه چوب تر (کیلوژول بر کیلوگرم کلونین) و u مقدار رطوبت چوب است.

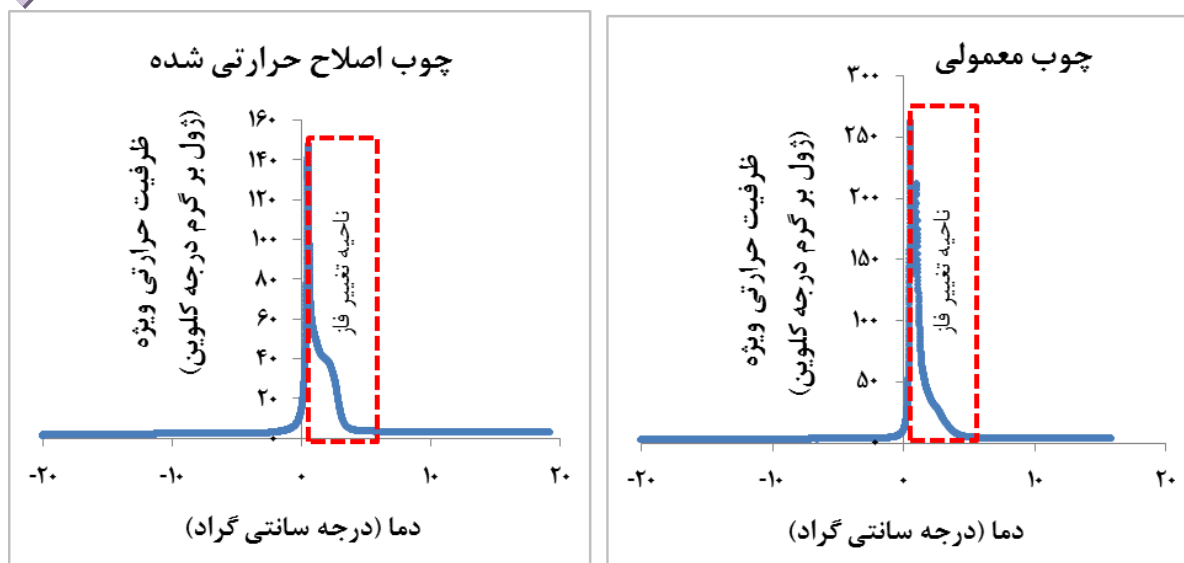
¹ Latent heat of melting



شکل ۵- منحنی های DSC نمونه های تر چوب معمولی و اصلاح حرارتی شده



شکل ۶- تغییرات ظرفیت حرارتی ویژه چوب معمولی و اصلاح حرارتی شده با دما در شرایط تر (اشباع از آب) در دمای کمتر از صفر درجه سانتی گراد



شکل ۷- تغییرات ظرفیت حرارتی ویژه نمونه های تر چوب معمولی و اصلاح حرارتی شده و ناحیه تغییر فاز آب آزاد موجود در نمونه ها

ترمودینامیکی چوب اصلاح حرارتی شده، مقدار ظرفیت حرارتی ویژه این نوع چوب اصلاح شده در دماهای بالاتر (برای مثال تا دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد) اندازه‌گیری شده و اثرات شرایط اصلاح (دما و محیط اصلاح) بر این ویژگی فیزیکی نیز بررسی شود. همچنین، اندازه‌گیری ظرفیت حرارتی ویژه سایر چوب‌های اصلاح شده تجاری در مقایسه با چوب اصلاح حرارتی شده در رطوبت‌های مختلف برای تحقیقات آتی پیشنهاد می‌شود.

سپاسگزاری

پژوهش حاضر مربوط به بخشی از تحقیقات انجام شده طی فرصت مطالعاتی مولف در دانشگاه ETH زوریخ سوئیس بود. از همکاری مدیریت گروه علوم مواد چوبی این دانشگاه آقای دکتر اینگو بورگت و دکتر امیل آنگلووند تیبرینگ و نیز حمایت‌های مالی روابط بین‌الملل پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران سپاسگزاری می‌شود.

نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که در دامنه دمایی ۰ تا ۲۰ درجه سانتی‌گراد، اصلاح حرارتی تاثیر معنی‌داری بر ظرفیت حرارتی ویژه چوب ندارد و الگوی تغییرات ظرفیت حرارتی ویژه با دما نیز برای هر دو نوع چوب معمولی و اصلاح شده مشابه بود. برخلاف همبستگی مثبت خطی بین ظرفیت حرارتی ویژه و دما در دماهای بالاتر از صفر درجه سانتی‌گراد، این رابطه در دماهای کمتر از صفر درجه سانتی‌گراد به صورت دو منحنی خطی با شیب‌های متفاوت بود. بنابراین، با توجه به نتایج به دست آمد می‌توان نتیجه‌گیری کرد که برای مصارفی که مقدار ظرفیت حرارتی ویژه چوب مهم است، چوب اصلاح حرارتی شده نسبت به چوب معمولی در این دامنه دمایی مزیتی ندارد. در مقابل، در دماهای کمتر از صفر درجه سانتی‌گراد و تحت شرایط تر، چوب اصلاح حرارتی شده از ظرفیت حرارتی ویژه بالاتری برخوردار بود، ضمن اینکه گرمای نهان ذوب آب آزاد یخ‌زده در چوب اصلاح شده بیشتر بود. پیشنهاد می‌شود در تحقیقات بعدی ضمن اندازه‌گیری سایر خواص

منابع

- [1] Thybring, E.E., 2014. Explaining the heat capacity of wood constituents by molecular vibrations. *Journal of Material Science*, 49: 1317-1327.
- [2] Czajkowski, L., Olek, W., Weres, J., Guzenda, R., 2016. Thermal properties of wood-based panels: specific heat determination. *Wood Science Technology*, 50:537-545.

- [3] Dunlop, F., 1912. The specific heat of wood. U.S. Dep. Agr., Forest Serv. Bull. 110.
- [4] Kollman, F.F.P., Cote, W.A., 1968. Principles of Wood Science and Technology, Springer-Verlag, Berlin, Germany.
- [5] Koch, P., 1969: Specific Heat of Oven-dry Spruce Pine Wood and Bark. Wood Science, 1(4): 203-214.
- [6] Kanter, K. R., 1957. The thermal properties of wood. Nauka i Tekhnika, 6(7):17-18.
- [7] Kuhlman, G., 1962. Investigation of the thermal properties of wood and particleboard in dependency from moisture content and temperature in the hygroscopic range. Holz als Roh-und Werkstoff, 20(7): 259-270.
- [8] Steinhagen, H.P., 1977. Thermal conductive properties of wood, green or dry, from -40 °C to 100 °C—a literature review. General technical report FPL-9, USDA Forest Service, Madison.
- [9] Gupta, M., Yang, J. and Roy, C., 2003. Specific heat and thermal conductivity of softwood bark and softwood char particles. Fuel, 82: 919–927.
- [10] Radmanović, K., Dukić, I. and Pervan, S., 2014. Specific Heat Capacity of Wood. Drvna Industrija 65 (2): 151-157.
- [11] Aggrey-Smith, S., Preko, K. and Owusu, F.W., 2016. Study of Thermal Properties of Some Selected Tropical Hard Wood Species. International Journal of Materials Science and Applications, 5(3): 143-150.
- [12] Li, K.Y., Fleischmann, C.M. and Spearpoint, M.J., 2013. Determining thermal physical properties of pyrolyzing New Zealand medium density fibreboard (MDF). Chemical Engineering Science, 95:211–220.
- [13] Standard Test Method for Determining Specific Heat Capacity by Differential Scanning Calorimetry, Annual Book of ASTM Standard, E 1269-11, 2018.
- [14] Deliiski, N., Tumbarkova, N., Stanev, R. and Dzurenda, L., 2015. Computation of the wood temperature conductivity above the hygroscopic range during wood freezing, Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW, Forestry and Wood Technology, 91: 40-45.

Specific heat capacity of thermally modified wood at different levels of temperature and moisture content

Abstract

The amount of specific heat capacity is important for processes that require heat transfer in wood, as well as for design of wood structures that undergo high temperature changes during day. In this research, specific heat capacity of thermally modified oak were measured in comparison with unmodified wood in the temperature range of -20 to 20 °C under dry and wet conditions using differential scanning calorimetry (DSC). Results showed that there was no significant difference between the specific heat capacities of two types of wood at dry condition, and the average values were 1.47 J.g⁻¹K⁻¹ at 20 °C and 0.84 J.g⁻¹K⁻¹ at -20 °C. In contrast, the specific heat capacity of the modified wood at -20 °C under wet condition was greater than that of unmodified wood, and more heat flux was used to melt the ice. In contrast to a linear relationship between the dry specific heat capacity and temperature in the range of 0 to 20 °C, the relationship was nonlinear for temperatures below 0 °C.

Keywords: specific heat capacity, thermally modified wood, differential scanning calorimetry.

A. Tarmian^{1*}

¹ Associate prof., Department of wood and paper science & technology, Faculty of natural resources, University of Tehran, Karaj, Iran

Corresponding author:
tarmian@ut.ac.ir

Received: 2018/10/15
Accepted: 2018/12/25